

ÉVALUATION DES ACTIONS THERMIQUES DANS LES PONTS

CONTEXTE

La présente procédure de diagnostic vise à évaluer les sollicitations thermiques, notamment celles du gradient thermique, qui s'exercent sur les ponts en béton ou en charpente métallique voire mixte.

Elle s'applique lorsqu'on souhaite un résultat plus précis que celui obtenu par l'application de valeurs forfaitaires des gradients thermiques extrêmes des règlements de calculs ou lorsque l'ouvrage présente des désordres pouvant être attribués à la sous-estimation ou à la non prise en compte des effets du gradient thermique.

Elle ne traite pas des autres types de matériaux (maçonnerie, bois, etc.) et structures.

Par suite de l'exposition aux variations météorologiques, et parfois à des facteurs liés à l'exploitation (conduites de transport de fluides chauds, lignes à haute tension, etc. intégrées à l'ouvrage), la température dans un ouvrage d'art n'est généralement ni uniforme, ni constante dans le temps. La non-uniformité des températures, et de leurs variations temporelles, engendrent dans les ouvrages d'art des contraintes et des déformations suffisantes pour affecter leur comportement en service : les phénomènes de dilatation thermique sont connus de longue date, et l'on n'ignore pas l'importance de ménager des joints à cet effet.

Or, si la prise en compte des variations de température dans les ponts en service est ancienne, la prise en compte du gradient thermique, c'est-à-dire des différences de températures dans le tablier, ne remonte en France qu'au milieu des années 1970 [1].

Elle est intervenue en réaction aux constats effectués lors de la construction des viaducs en béton précontraint de Verberie (1964) puis de Champigny-sur-Yonne (1970).

En vue de la conception des ponts, puis de leur évaluation structurale, l'ingénieur doit être à même d'estimer les valeurs extrêmes, non seulement des sollicitations thermiques, mais aussi des écarts de températures extrêmes entre éléments. Cette question est semblable à celle des périodes de « retour » de crues en hydrologie : la distribution de température, comme sa variation temporelle, est dictée par les conditions propres au site où se trouve l'ouvrage.

Effets de l'action thermique

La variation de température agit sur les structures comme un chargement volumique particulier, et son action est indissociable des liaisons ou appuis d'une part, et de la nature des matériaux d'autre part.

L'analyse des déformations thermiques dans les tabliers de ponts montre que celles-ci proviennent principalement de deux grandeurs : la **température moyenne** de la structure et le **gradient thermique vertical** tel que défini par les règlements de calculs (différence de températures entre extrados et intrados). Comme ces deux grandeurs sont, pour une même section de pont, variables dans le temps, les règlements recommandent de prendre en compte une valeur représentative correspondant à une période de « retour » conventionnelle [2].

La distribution de température dans un tablier de pont (cf. coupe 1.a à gauche) est généralement irrégulière ; elle se décompose en un profil linéaire (cf. coupe 1.b au centre), entraînant une flexion composée d'origine thermique, et un résidu thermique (cf. coupe 1.c à droite), provoquant des contraintes autoéquilibrées (de résultante nulle), ou « autocontraintes ».

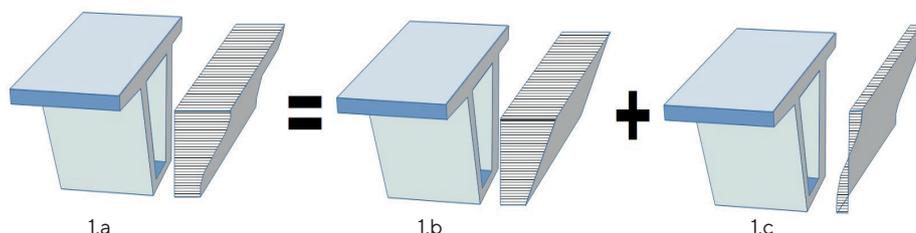


Figure 1 : Distribution de température dans un tablier de pont de type caisson en béton.

Dans une section de tablier, les températures sont distribuées selon un axe vertical (cf. coupe 2.a en haut, températures max. en rouge, min. en bleu) ; l'asymétrie transversale (amont-aval) (cf. coupe 2.b au centre) est généralement secondaire, mais doit être considérée dans certains cas (multi-caissons, tabliers courbes, etc.) ; enfin, les autocontraintes thermiques (cf. coupe 2.c en bas) sont auto-équilibrées et déforment la section du tablier dans son plan.

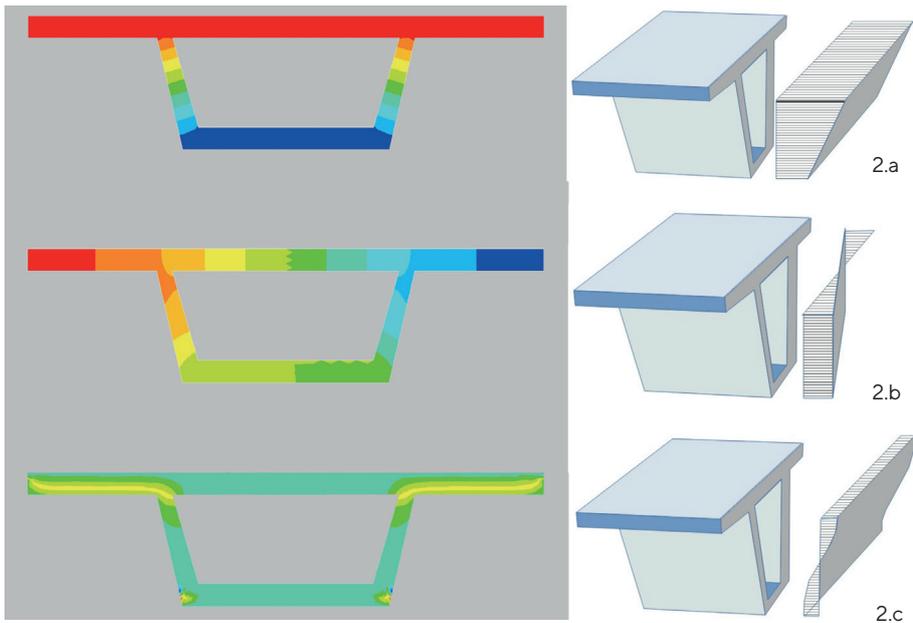


Figure2 : Distribution des températures dans une section de tablier de pont de type caisson en béton

Pour les tabliers isostatiques (voir Figure 3), le gradient thermique provoque une cambrure du tablier par dilatation différentielle des fibres longitudinales, sans créer de contrainte dans le ou les matériaux.

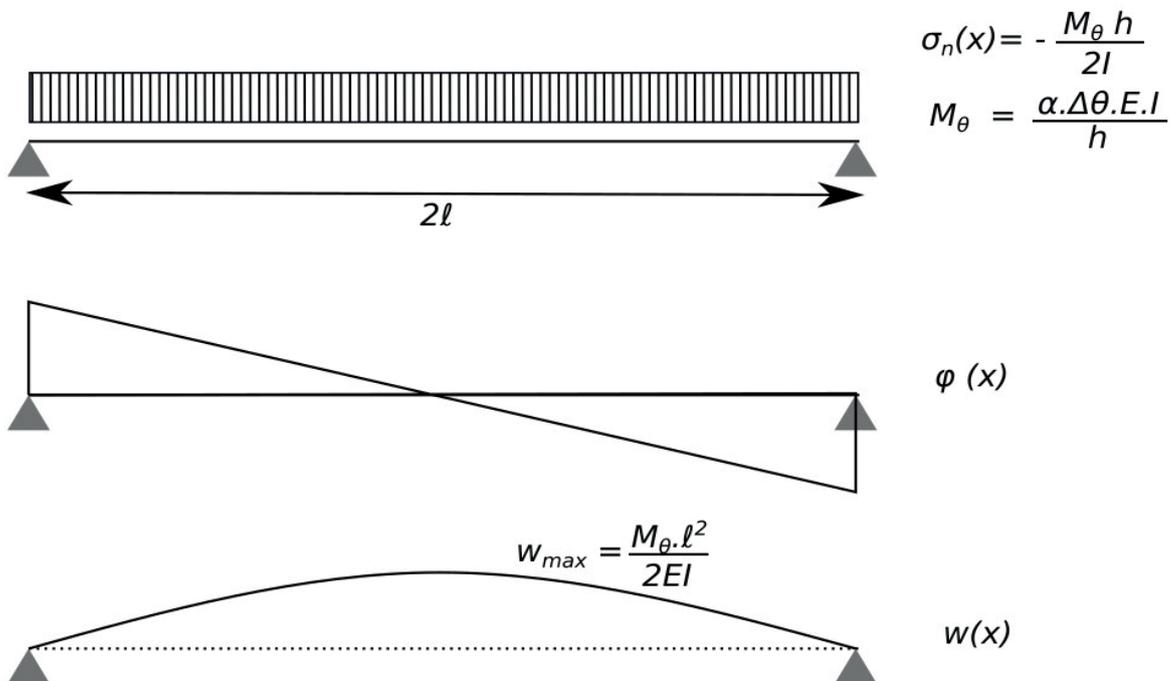


Figure 3 : Le gradient thermique est pris en compte par la déformation imposée dans chaque section. Un gradient uniforme, dans une poutre isostatique, produit une déformée sans réaction d'appui. M_θ est un chargement fictif qui donne la même déformation de la poutre que le gradient thermique; θ est la rotation des sections droites; w est le déplacement vertical de la fibre moyenne.

Pour les tabliers hyperstatiques (à poutre ou dalle continue, cf. figure 4), le gradient thermique crée un moment de flexion qui se superpose aux sollicitations générées par les charges permanentes et d'exploitation.

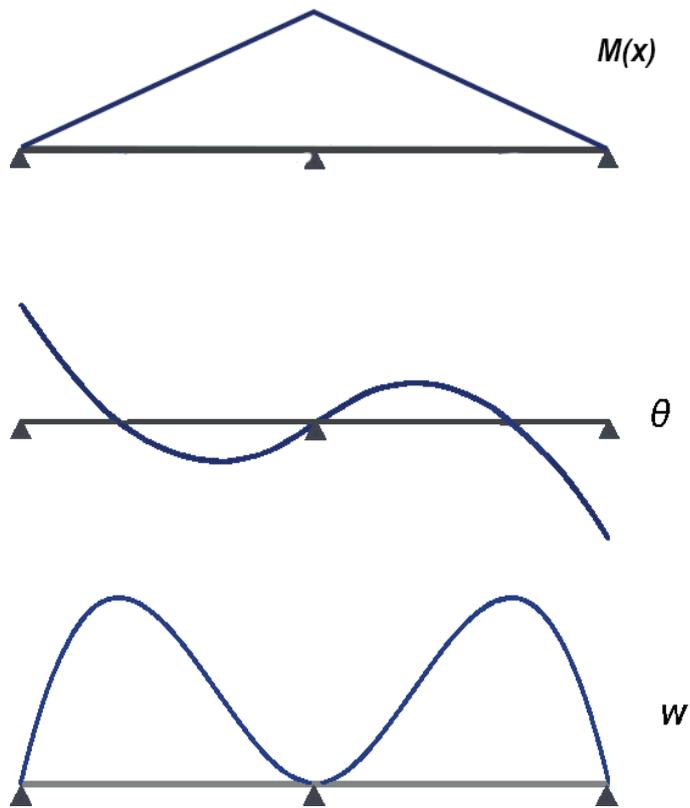


Figure 4 : Dans une poutre continue, un gradient uniforme produit des réactions aux appuis ; mais la déformée ne peut se déduire du seul diagramme de moment fléchissant. M est le moment de flexion créé par le gradient thermique, θ est la rotation des sections droites ; w est le déplacement vertical de la fibre moyenne.

Le signe du gradient thermique vertical est extrêmement important : lorsque la température de l'extrados est plus élevée que celle de l'intrados (gradient dit « positif »), ses effets sont, dans les deux tiers centraux d'une travée, antagonistes de ceux de la précontrainte, et le risque est la décompression partielle, momentanée, du tablier en fibre inférieure ; dans le cas opposé (gradient thermique « négatif »), les contraintes d'origine thermique se conjuguent à celles de la précontrainte et peuvent occasionner des dépassements locaux de contrainte de compression réglementaire du béton.

Selon le signe de ce gradient :

- la flèche du tablier peut se trouver diminuée (gradient « positif »),
- l'effet favorable de la précontrainte peut être partiellement annulé, entraînant une décompression locale du béton, et donc la formation de fissures de traction,
- les réactions d'appui peuvent être augmentées aux appuis d'extrémités et diminuées aux appuis intermédiaires (gradient « positif »).

Par ailleurs, il est courant de lire ([3] p. 42) que les effets thermiques sont sans effet sur un tablier isostatique, car les liaisons permettent une libre déformation des membrures longitudinales par dilatation/rétraction ; cependant, si les joints de dilatation sont écrasés, ou si des appareils d'appuis sont grippés (par suite de corrosion, d'ensevelissement ou d'une mise en butée), la déformation, gênée, engendre des efforts parasites dans le tablier, pouvant aller dans des cas extrêmes jusqu'à des ruptures d'éléments structuraux. En outre, il faut se poser la question du fonctionnement transversal du tablier, qui n'est pas forcément isostatique (dalle large, cf. figure 5).

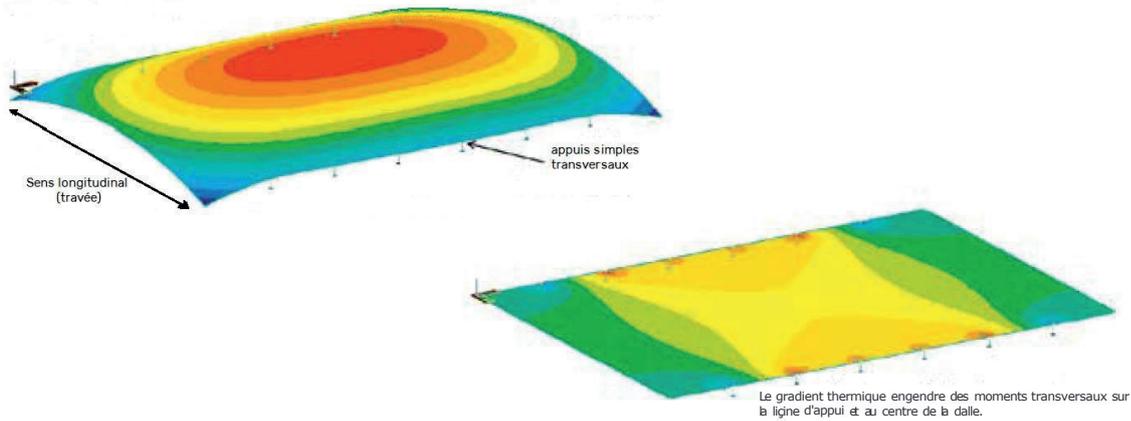


Figure 5 : Effets transversaux d'un gradient thermique positif et du poids propre sur une dalle large isostatique longitudinalement et comportant 6 appareils d'appui par ligne d'appui.

D'autre part, les effets thermiques sur un ouvrage isostatique fissuré peuvent amplifier certains désordres, en accroissant les ouvertures des fissures.

Enfin, la notion de gradient thermique peut s'étendre à des différences de température entre différents éléments d'un ouvrage d'art, dont il convient d'apprécier les effets.

Dans l'expertise d'un ouvrage, on cherche à caractériser, de la façon la plus fine possible, les extremums de température moyenne et de gradient thermique dans un site donné. On s'affranchit ainsi d'exigences qui découleraient de l'application de valeurs forfaitaires réglementaires pouvant être inadaptées aux conditions réelles du site. Il n'y a pas lieu de cumuler les effets des valeurs extrêmes des deux phénomènes thermiques ; l'Eurocode propose des combinaisons pondérées. Une instrumentation menée sur une période suffisamment longue pourrait permettre, pour des ouvrages le justifiant, de déterminer les valeurs concomitantes aux extremums des deux phénomènes thermiques (cependant rarement mis en œuvre en pratique).

Le gradient thermique, par sa nature (il est lié à un calcul de flexion), n'est « bien utilisé » que si on le considère dans une section soumise à de la flexion composée, donc assez loin des appuis. On peut bien sûr mesurer un gradient dans n'importe quelle section : près d'un appui, cela aura un sens, mais les effets thermomécaniques devront être appréciés d'une façon particulière.

Enjeux selon la nature de l'ouvrage

La plupart du temps, la décision d'entreprendre une étude thermique d'un ouvrage résulte du constat, lors d'une inspection détaillée, de la présence de désordres pouvant avoir pour origine des sollicitations thermiques.

Les éléments constitutifs de la structure (ses matériaux, ses appuis, ses dimensions longitudinales et transversales –portées, surface-, la présence d'éléments « actifs » : câbles ou barres de précontrainte, pré-cintrement, etc.) influent sur son comportement thermique.

Les structures isostatiques les plus simples ne sont normalement pas sujettes à des surcharges ou instabilités thermiques, à condition que leurs appuis fonctionnent correctement. Des rotations empêchées par grippage ou corrosion d'un pivot, la mise en butée du tablier, vont par contre se traduire par des fissures ou des déformations anormales, liées à l'impossibilité pour les matériaux constitutifs de se dilater ou de se contracter, totalement ou partiellement.

En ce qui concerne les matériaux, il existe une différence essentielle entre le métal et le béton, qui tient d'une part à la différence de diffusivité thermique des deux matériaux, d'autre part à la différence de morphologie des tabliers en béton et en acier.

Ponts à tablier métallique

La diffusivité thermique des métaux, c'est-à-dire le rapport de leur conductivité et de leur capacité calorifique, est environ sept fois supérieure à celle du béton, ce qui implique que la température est généralement beaucoup plus rapidement homogène dans un tablier métallique que dans un tablier en béton ; mais dans les charpentes, les contacts entre pièces ne se font que par les assemblages, donc de façon ponctuelle, d'où finalement des gradients thermiques très supérieurs à ceux des ponts mixtes ou des ponts en béton ([4] p. 318).

Par exemple, les tabliers métalliques à platelage orthotrope présentent une grande différence de température entre le platelage au contact des couches de chaussées (chaudes, car exposées au rayonnement diurne) et les âmes des poutres ou du caisson. Cela explique pourquoi l'Eurocode 1 ([5], tableau 6.1) prévoit des gradients thermiques plus importants pour les tabliers de pont métallique que pour les tabliers de pont en béton.

L'Eurocode 1 distingue les ponts à poutre caisson des ponts en treillis ou à poutres de type profilé : pour les caissons métalliques, la température uniforme extrême et le gradient thermique vertical à prendre en compte sont plus élevés, y compris dans les âmes.

Pour les ponts à poutres, l'attention est attirée sur les différences de température simultanées entre un arc et son tirant (§ 6.1.6).

Les assemblages anciens des pièces métalliques longues (pannes, sablées) par rivets ou boulons étaient en principe conçus pour permettre une dilatation répartie des bielles, entrants et bracons par la présence de trous oblongs ([6] p. 185 et suivantes).

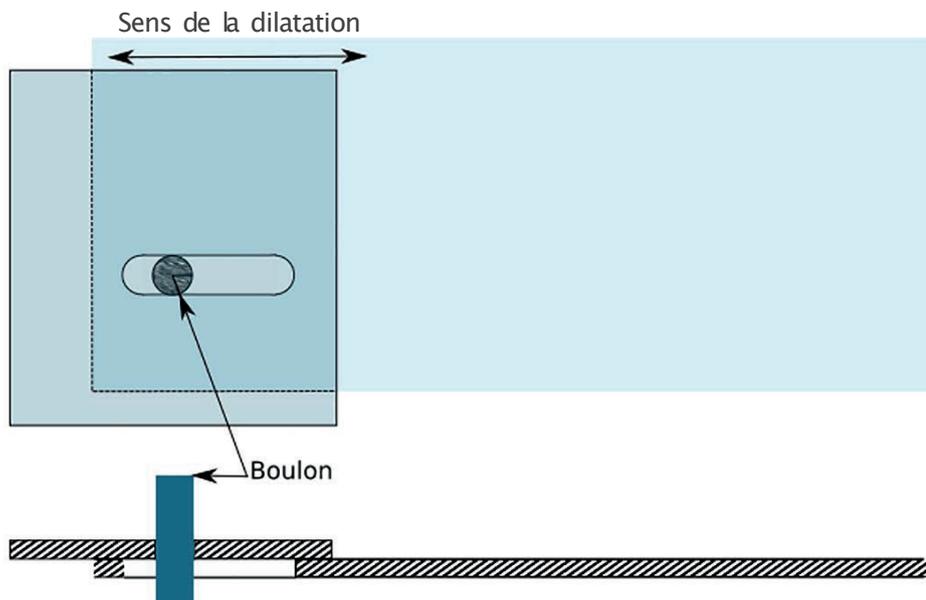


Figure 6 : Exemple d'assemblage par trou oblong, permettant une libre dilatation longitudinale.

Enfin, l'Eurocode 3 ([7] annexe A 3.2) met en garde contre l'effet des gradients thermiques transversaux dans le cas d'appareils d'appui à balancier linéaire ou à simple rouleau, compte tenu des implications d'une pression inégalement répartie le long des pièces d'appui.

Ponts en béton

Tous les ouvrages en béton sont concernés par la dilatation thermique ; ce sont ici en particulier les appareils d'appui et les joints de dilatation qui sont à surveiller et dont les dimensions et réglages doivent être compatibles avec l'amplitude thermique réelle.

Les ponts en arc, à béquilles, tabliers encastrés sur appuis, etc. doivent faire l'objet d'une attention particulière quant à la prise en compte des dilatations thermiques.

Parmi les ouvrages en béton précontraint, les ponts caissons hyperstatiques à éléments préfabriqués sont particulièrement sensibles aux gradients thermiques qui localisent les déformations au droit des joints, ce qui peut conduire à des ouvertures préjudiciables et à divers désordres (corrosion, endommagement par fatigue des armatures de précontrainte, infiltrations, écrasements localisés).

Les effets thermiques locaux qui affectent les pièces d'appuis sont difficiles à détecter. Les désordres ne sont souvent perçus qu'à un stade avancé. Ils sont parfois détectés de façon indirecte (examen des superstructures, etc.).

Dans les ponts en béton précontraint antérieurs à 2010 (application des Eurocodes), les gradients thermiques négatifs n'étaient pas pris en considération. Sur ces ouvrages, en l'absence de pathologie, l'application de la valeur forfaitaire du gradient négatif de l'Eurocode 1 peut conduire à des confortements dispendieux. Cependant, les ouvrages à nervures hautes sont, sur appuis, sensibles aux gradients négatifs.

Ponts mixtes

L'Eurocode 1 partie 1.5 [5] recommande de les traiter avec autant d'importance que les caissons en béton précontraint pour le gradient thermique négatif, et autant d'importance que les dalles orthotropes pour les gradients thermiques positifs. En effet, la difficulté à vérifier l'état de la connexion (fatigue, arrachement, etc.) incite à la prudence.

Contrairement aux autres ponts, on considère souvent dans le calcul des ponts mixtes, non pas un gradient thermique linéaire, mais un saut de température entre l'acier et le béton (+/-10°C), pour prendre en compte la différence de vitesse d'échauffement entre les deux matériaux ; cette pratique ne s'applique pas aux ponts à poutrelles enrobées.

Enjeu selon l'exposition du site

Les principaux facteurs météorologiques sont (cf. [4], p. 315) : la température de l'air, l'intensité du rayonnement solaire, la vitesse et la direction du vent par rapport au tablier, et l'hygrométrie de l'air. Ces facteurs sont fonction du site et de l'orientation de l'ouvrage (zone climatique, effet de vallée, ombre pluviométrique, présence d'une couche d'inversion, adret/ubac, etc.). L'Eurocode 1 mentionne également l'effet d'exposition ([5], § 6.1.4.3).

On peut enfin chercher à obtenir une caractérisation de l'effet de site par instrumentation directe de l'ouvrage ; un modèle numérique de transfert thermique ([5], annexe D) permettra de déterminer les points de mesure pertinents pour cette caractérisation.

Remarque : au-delà des prescriptions du zonage climatique réglementaire du territoire national, il est à présent possible de s'appuyer sur les données détaillées fournies par le Copernicus Climate Change Service de l'Union Européenne (Climate Data Store) : cette base de données en ligne fournit notamment les données statistiques locales sur l'hygrométrie, la température de l'air, la vitesse et la direction du vent ; toutefois, l'intégration de ces données dans le calcul suppose une modélisation, au sens large, de la réponse du tablier à ces conditions extérieures.

ÉTAPE 1
ANALYSE DU DOSSIER DE
L'OUVRAGE

On recherche particulièrement dans le dossier de l'ouvrage si les effets thermiques ont été pris en compte dans le dimensionnement, et de quelle manière (forfaitaire, bibliographique, utilisation de modèle réduit, etc.). À partir de l'identification des matériaux constituant le tablier, il est possible d'en déduire leurs caractéristiques thermiques (coefficient de dilatation thermique, capacité calorifique et conductivité thermique). Pour les ouvrages de type caissons en béton précontraint, ce n'est qu'à partir de 1975 (circulaire « Darpas » [1]) que le gradient thermique a été pris en compte en valeurs forfaitaires dans le dimensionnement.

Rapports d'inspection : il y a lieu de relire les éventuels rapports d'inspection pour identifier des fissurations pouvant traduire des insuffisances liées à la non ou mauvaise prise en compte des effets thermiques (par exemple fissurations transversales ou ouverture de joints entre voussoirs en intrados à proximité d'appuis intermédiaires) ; par ailleurs, étant donné la forte dépendance des contraintes thermiques vis-à-vis de la nature des appuis et, par là-même, des degrés de liberté laissés au tablier, il y a lieu de porter une attention particulière aux appareils d'appuis : les inspections peuvent en effet signaler des altérations de ces derniers, ou parfois des désordres caractéristiques d'un dysfonctionnement des appareils d'appui (par exemple fissurations anormales du béton ou d'assemblages soudés, déformations anormales, cloquages, etc.).

ÉTAPE 2
INSPECTION DÉTAILLÉE

Si l'ouvrage n'a pas fait l'objet d'une inspection détaillée ou si la dernière est trop ancienne, il est nécessaire d'en programmer une. Cette inspection s'attachera en particulier à relever les désordres pouvant résulter de phénomènes thermiques (cf. éléments analysés dans le dossier d'ouvrage à l'étape 1).

ÉTAPE 3
ÉVALUATION THERMIQUE

L'objectif de l'évaluation thermique (détermination des périodes de « retour » de la température moyenne, ou détermination du gradient thermique et de la température moyenne), **lorsqu'elle est jugée nécessaire**, doit être déterminé à l'issue des deux étapes précédentes.

Plusieurs approches sont possibles pour déterminer ces valeurs. La méthode forfaitaire, qui constitue l'étape préliminaire de l'évaluation, est décrite en premier.

Méthode forfaitaire : La méthode forfaitaire est proposée dans la partie 1.5 de l'Eurocode 1 et repose sur une cartographie du territoire donnée dans l'annexe nationale. Elle revient à adopter, pour les valeurs caractéristiques, une température moyenne et des gradients (positifs et négatifs) déterminés. Ces valeurs sont, par nature, conservatives, mais elles permettent une estimation a priori du risque. Les méthodes qui suivent peuvent permettre d'affiner l'appréciation qui découle de l'approche forfaitaire, et aboutissent généralement à des sollicitations moins sévères de l'ouvrage. Elles nécessitent toutes la mise en œuvre d'une instrumentation sur une période représentative permettant d'apprécier les fluctuations temporelles de températures propres au site de l'ouvrage. Ces méthodes peuvent justifier des mesures de renforcement ou de modification d'exploitation moins onéreuses.

Recours à l'instrumentation : La détermination de la température moyenne et du gradient thermique par mesure directe repose sur une instrumentation de la structure par capteurs pendant une période d'observation la plus longue possible et *a minima* de 12 mois (cycle annuel). Les valeurs cinquantennales sont alors extrapolées par calage d'une loi de probabilité (cf. **annexe spécifique**).

Note : l'instrumentation peut aussi permettre de recalibrer la valeur du coefficient de dilatation thermique apparent en couplant mesure de température et mesure de déplacements.

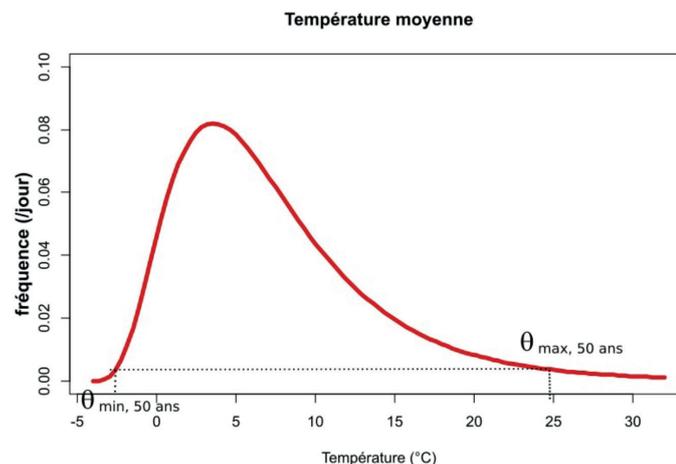


Figure 7 : Principe de la détermination de la température moyenne cinquantennale à partir d'un histogramme.

Un calcul d'incertitude simple montre qu'avec 70 000 mesures consécutives (soit deux années de mesures avec un profil de température relevé tous les quarts d'heure), on ne peut apprécier avec une incertitude de 5 % que le gradient quinquennal ; or il est rarement possible, dans les projets, de différer davantage les études de réparation. L'estimation que l'on obtient du gradient cinquantennal n'est donc qu'indicative, mais elle donne au projeteur une indication importante sur la pertinence du gradient forfaitaire de l'Annexe Nationale de l'Eurocode pour la région d'étude. Mais surtout, la mesure directe est la seule méthode qui permet de corréler les mesures issues de la surveillance mécanique et géométrique d'un ouvrage pathologique avec l'état thermique réel des matériaux et de confirmer que les désordres observés résultent principalement de sollicitations thermiques.

Les températures mesurées doivent être représentatives des températures internes des matériaux (capteurs placés dans la masse des ouvrages en béton).

L'implantation des capteurs à adopter pour les différents types de tablier de pont en béton est donnée dans la note de B. Tonnoir [8] ; pour les caissons métalliques, cf. article de Lucas et Virlogeux [9]. On en trouve un exemple dans les fiches [C3.17 \(Mesures de températures par thermocouple, thermistance ou sonde\)](#) et [C3.20 \(Mesure du gradient thermique dans les ouvrages en béton\)](#) du présent cahier interactif.

Différents modèles

(a) Justification bibliographique

Dans les cas courants, l'annexe de l'Eurocode 1.5 fournit des profils de température par type de structures, qui permettent de définir une distribution continue des températures sur la hauteur de la section à partir des températures mesurées en un nombre limité de points. Cette distribution permet de définir un gradient thermique « équivalent » à utiliser dans le modèle de calcul.

Pour certains ouvrages exceptionnels, il peut être possible de trouver des éléments bibliographiques plus adaptés aux spécificités de l'ouvrage étudié que ceux fournis dans l'annexe 1.5 de l'Eurocode.

En effet la bibliographie disponible fournit un grand nombre de résultats de mesures sur des ouvrages en service et même des profils de température pour les situations extrêmes, obtenus par intégration de l'équation de la chaleur. Ces articles proposent des méthodes permettant de relier la distribution interne des températures du tablier étudié aux données météorologiques. Par exemple, un profil typique des températures dans un caisson métallique est proposé dans l'étude de Lucas et Virlogeux sur le viaduc de Millau [9], voir Figure 8. Pour les ponts mixtes, on peut se référer à l'étude d'Emerson [10].

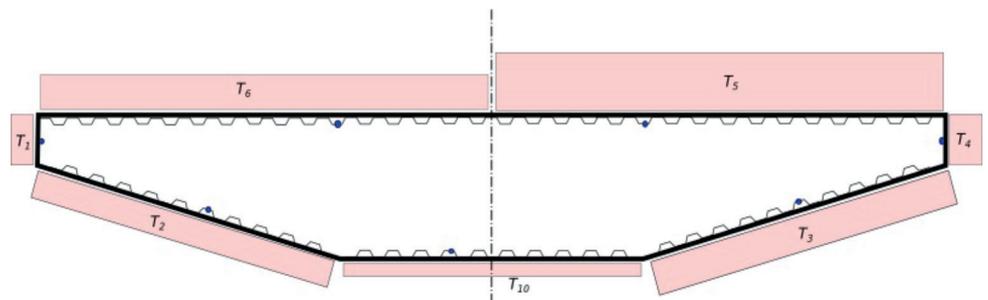


Figure 8 : Définition d'un profil de température sur une section de caisson (exemple tiré de Zhang et al. [11]). Les températures imposées T_1, \dots, T_{10} sont des fonctions déterminées du temps : elles permettent notamment de décrire les fluctuations jour/nuit, ou saisonnières, et de traduire des asymétries de chargement thermique.

L'adoption d'un profil de température issu de la bibliographie, devant être justifié par l'analogie entre l'ouvrage à considérer et le ou les exemples de référence, ramène l'estimation des gradients extrêmes au recueil chronologique par instrumentation d'un nombre réduit de températures de l'ouvrage (températures représentatives).

(b) Développement et utilisation d'un modèle numérique

Comme l'instrumentation directe de l'ouvrage exige un temps d'observation significatif, les projeteurs ont cherché, depuis le milieu des années 1990, des formules de corrélation entre la répartition de température dans un tablier et les variables météorologiques, disponibles en plus grand nombre et selon un maillage territorial aujourd'hui suffisamment dense [9].

Cette approche a pour but de construire une relation donnant la température moyenne T_{moy} et le gradient thermique vertical ΔT en fonction de plusieurs paramètres environnementaux :

$$T_{moy} = T_0 + \lambda_A T_{air} + \lambda_V V_{vent} + \lambda_D \tan(\alpha_{vent}) + \lambda_h \omega_{air}$$

$$\Delta T = \mu_0 + \mu_A T_{air} + \mu_V V_{vent} + \mu_D \tan(\alpha_{vent}) + \mu_h \omega_{air}$$

où les paramètres de calage du modèle T_0 , μ_0 , λ_{Dk} et μ_{Dk} sont déterminés :

- soit par régression linéaire de mesures directes sur l'ouvrage et recueil des données météorologiques locales [9] ;
- soit par simulation numérique de la réponse thermique du tablier sur un grand nombre de cycles [12]. Il faut cependant signaler la difficulté particulière à l'identification correcte des conditions aux limites (variables dans le temps, cf. figure 8) pour ces calculs et au choix des coefficients d'échange thermique du tablier avec son environnement, qui combinent échange par rayonnement et par convection. Ces coefficients varient suivant l'exposition et l'heure du jour, et leur rôle est central dans l'analyse ; mais on ne peut valablement les justifier que sur des données d'observation.

En pratique, il est difficile de réunir ces données et de se faire une idée juste du moment d'apparition des gradients positifs et négatifs maximaux. Une instrumentation prolongée au moins sur une année complète (de façon à obtenir les variations journalières et saisonnières) est nécessaire.

Contrairement à l'amplitude thermique, le gradient thermique vertical, dans une région donnée, dépend considérablement de l'orientation de la structure suivant les points cardinaux (exposition de l'ouvrage).

(c) Construction itérative d'un modèle de connaissance

Ces méthodes reposent sur la comparaison entre le champs de température en différents point d'une section de pont, et quelques paramètres d'ambiance de l'ouvrage (tels que ceux fournis par les stations météorologiques voisines). Un algorithme d'apprentissage automatique, éventuellement complété par quelques relations empiriques données par l'utilisateur, identifie les formules de corrélation du type :

$$T_{moy} = T_0 + \lambda_A T_{air} + \lambda_V V_{vent} + \lambda_D \tan(\alpha_{vent}) + \lambda_h \omega_{air}$$

$$\Delta T = \mu_0 + \mu_A T_{air} + \mu_V V_{vent} + \mu_D \tan(\alpha_{vent}) + \mu_h \omega_{air}$$

L'application de telles techniques connaît un grand essor depuis 2015 [11, 13].

En l'absence de données thermiques (gradient thermique et température moyenne), il sera nécessaire de réunir une chronique des variations de température au niveau de l'ouvrage même, sur plusieurs années.

Une étape élémentaire consiste à examiner quelles stations météorologiques sont les plus voisines, et si les données qu'on y enregistre sont raisonnablement utilisables pour l'ouvrage. Les principales objections à la transposition de ces enregistrements sont : un effet de vallée important, une situation d'ombre pluviométrique, ou la présence d'une grande étendue fluviale ou lacustre à proximité du pont.

Une fois que l'on a réuni les séries chronologiques de la température moyenne et du gradient thermique, il est possible d'en déduire les valeurs extrêmes suivant la période de retour considérée ([voir l'annexe spécifique](#)).

RÉFÉRENTIEL

- [1] DIRECTION DES ROUTES, 1975. *DRCR du 2 avril 1975 (annexée à la circulaire 79-121) modifiant l'Instruction Provisoire IP1, également dénommée circulaire « Darpas »*, concernant les ponts à poutres caissons en béton précontraint, mise à jour par la circulaire du 8 octobre 1983 (i.e. BAEL et BPEL 1983).
- [2] ZICHERNER, T., 1981. Thermal effects on concrete bridges. **In** *FIB-CEB Enlarged meeting (GT2), oct. 1981, Pavie*. p. 292-313.
- [3] MASSONET, Ch., 1962. *Résistance des matériaux*, éd. Dunod.
- [4] JACCOUD, J.-P., 1982. Gradients de température dans les ponts : résumé des connaissances actuelles et indications pour le dimensionnement. *Ing. Et Arch. Suisses* n° 23, p. 315-322.
- [5] AFNOR, 2004. *Eurocode 1 : actions sur les structures – Partie 1-5 : actions générales – Actions thermiques*. NF EN 1991-1-5, AFNOR.
- [6] BOLL, G., 1957. *Cours de constructions métalliques. Vol. II Assemblages et détails de construction*. Eyrolles, p. 185 et suivantes.
- [7] AFNOR, 2005. *Eurocode 3 : calcul des structures en acier*. NE EN 1993, AFNOR
- [8] TONNOIR, B., 2005. Méthode pour l'évaluation du gradient thermique et de la température moyenne dans une section d'ouvrage en béton. **In** *Base Gedoq du LCPC, 1999 (révisé en 2005)*, 36 p.
- [9] LUCAS, J.M., VIRLOGEUX, M. et CLAUDE, L., 2005. Temperature in the box girder of the Normandy Bridge. *Struct. Eng. Int.* 2005, vol. 15, Nr. 3, IABSE
- [10] EMERSON, M., 1977. Temperature differences in bridges : basis of design requirements. *TRL report Nr. 765*

-
- [11] ZHANG, W. M., WANG, Z. W. et LIU, Z., 2020. Joint distribution of wind speed and air temperature actions on long-span bridges derived via trivariate metaelliptical and Plackett copulas. *J. of Bridge Engineering*, 2020, 25 (9)
- [12] TAYŞI; N. et ABID, S., 2016. Temperature and variations in concrete box-girder bridges: Experimental and finite element parametrical study. *Adv. Struct. Eng.* 2016, Vol. 18 (4), p. 469-486
- [13] ZHAO, D. Y., REN Y. et HUANG, Q., 2019. Analysis of temperature-induced deflection of cable-stayed bridge based on BP neural network. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 242. (Consulté le 10/12/2024). Disponible sur <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/242/6/062075/pdf>.
- [14] SETRA, 2010. *Eurocodes 0 et 1: application aux ponts-routes et passerelles*. Éd. Sétra, Bagnaux, 220 p. (Consulté le 10/12/2024). Disponible sur <https://doc.cerema.fr/Default/digital-viewer/c-14123>
- [15] DEFAUCHEUX, L., SERVANT, C., DESPRETS, H. et HAJAR, Z., 2015. Viaduc de Millau : étude du comportement thermique du tablier par analyse des mesures de température dans le caisson métallique. **In** Colloque GC'2015 de l'AFGC. 15 p

Autres documents du cahier interactif appelés par la procédure :

- [fiche d'auscultation C3.17 « Mesures de températures par thermocouple, thermistance ou sonde »](#)
- [fiche d'auscultation C3.20 « Mesure du gradient thermique dans les ouvrages en béton »](#)

LOGIGRAMME

Un logigramme ou un schéma décisionnel, visualisant de façon séquentielle et logique les actions à mener et les décisions à prendre pour aboutir au diagnostic résume la méthodologie de diagnostic.

E1-1 : ÉVALUATION DES ACTIONS THERMIQUES DANS LES PONTS

